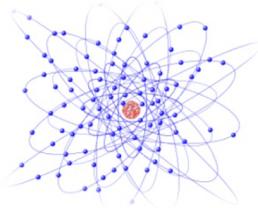


# Electricité

Toute la biologie, la chimie et une bonne partie de la physique sont régies par l'interaction de charges électriques.

L'histoire de l'électricité commence avec l'ambre dans l'antiquité (résine fossile de conifère comme le pin). Les Grecs avaient remarqué que lorsque l'ambre est frotté avec un tissu de laine ou de la fourrure, il attire des corps légers (morceau de bois,

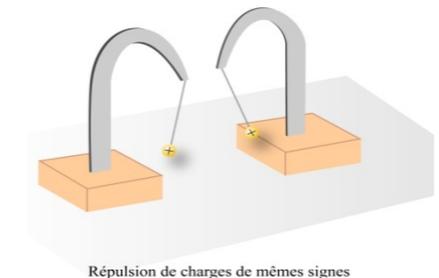
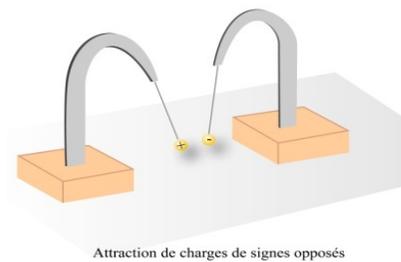
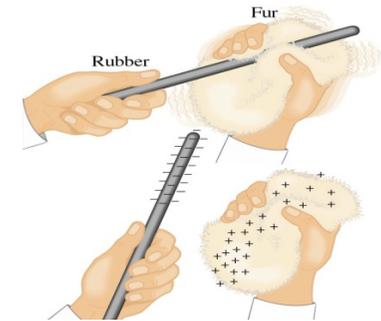


cheveux,...). Il est également capable de dévier un filet d'eau. Platon, philosophe grec réputé (IV<sup>e</sup> siècle av. JC), mentionna « les merveilles concernant l'attraction de l'ambre ». Le mot grec qui signifie ambre est **elektron**. La quantité d'électricité acquise par un corps frotté fut appelée **charge**. Nous sommes amenés à penser qu'il y a une nouvelle force appelée **force**

**électrique** et la cause responsable de la force est la charge électrique. Presque tous les phénomènes physiques que nous observons, comme la lumière, les réactions chimiques, les propriétés de la matière ou la transmission des signaux par les fibres nerveuses, sont de nature électrique. En fait, la force gravitationnelle est, parmi les forces observées dans la vie courante, la seule qui ne soit pas de nature électrique. La conception et le fonctionnement des postes de radio ou de télévision, des moteurs, des ordinateurs ou des machines à rayons X reposent sur l'interaction entre des charges électriques. La charge est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques. L'étude des effets électriques créés par des charges au repos est ce que l'on appelle **l'électrostatique**. Le mouvement des charges fait surgir des effets magnétiques combinés aux effets électriques. Les 2 effets étant reliés, on parle d'**électromagnétisme** pour décrire l'ensemble des interactions.

## La charge électrique : répulsion et attraction

Lorsqu'on frotte une tige d'ébonite avec de la fourrure, la tige et la fourrure se chargent. Pour étudier la charge ainsi produite, on peut utiliser des boules en mousse, légères et capables de garder la charge. La figure représente 2 de ces boules suspendues à faible distance l'une de l'autre. Lorsqu'on touche l'une des boules avec la tige et l'autre avec la fourrure, elles s'attirent mutuellement. Mais lorsqu'on touche les 2 boules avec le même objet, la tige ou la fourrure, elles se repoussent.



2 charges identiques se repoussent et 2 charges différentes s'attirent.

Il existe donc 2 types de charges : positives et négatives.

## Quantification

Selon notre conception actuelle, un objet neutre possède le même nombre de charges positives et négatives. La matière est composée d'atomes (de rayon  $r \approx 10^{-10}$  m), chaque atome étant formé d'un noyau (de rayon  $\approx 10^{-15}$  m) contenant des protons chargés positivement et des neutrons électriquement neutres. Des électrons de charges négatives forment la structure extérieure de l'atome. Un atome neutre possède un même nombre de protons et d'électrons. Un ion est un atome ou une molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons.

Notons que le frottement fait passer des électrons ou des ions d'un corps à l'autre, ce qui fait apparaître une charge nette positive sur l'un des corps et une charge nette négative sur l'autre.

Tous les corps macroscopiques, y compris nous-mêmes, contiennent des nombres énormes de charges individuelles minuscules, mais globalement, ils sont généralement neutres. Les corps macroscopiques ne subissent généralement pas de forces électriques entre eux, tandis qu'ils subissent toujours des forces gravitationnelles.

La charge est une propriété de la plupart des particules subatomiques qui constituent la matière de l'Univers. L'unité de la charge est le coulomb [C]. Il correspond à une très grande quantité de charge : en général, la charge qui apparaît sur un corps lorsqu'on le frotte est de l'ordre de  $10^{-8}$  C, alors que la foudre peut faire passer jusqu'à 20 C entre un nuage et la terre. Lorsqu'on charge un corps par frottement, la proportion des atomes de la surface qui perdent ou gagnent un électron n'est que d'un sur 100'000. La charge électrique n'existe qu'en quantités discrètes ; on dit qu'elle est quantifiée. Le quantum de charge  $e$ , ou brique élémentaire de la charge électrique, fut mesurée pour la première fois en 1909 par Millikan (1869-1953).

On appelle charge élémentaire  $q_e$  la charge portée par l'électron (p.157 F&T):

$$\text{Charge de l'électron : } q_e = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [C]}$$

L'électron est chargé négativement ; il repousse les électrons et attire les protons. Ceux-ci sont chargés positivement et leur charge vaut :

$$\text{Charge du proton : } q_p = +e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [C]}$$

Bien que la masse du proton soit environ 1836 fois plus grande que celle de l'électron, leurs charges sont équivalentes au signe près.

**Toute charge électrique  $q$  est un multiple entier de cette charge fondamentale :**

$$q = 0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots$$

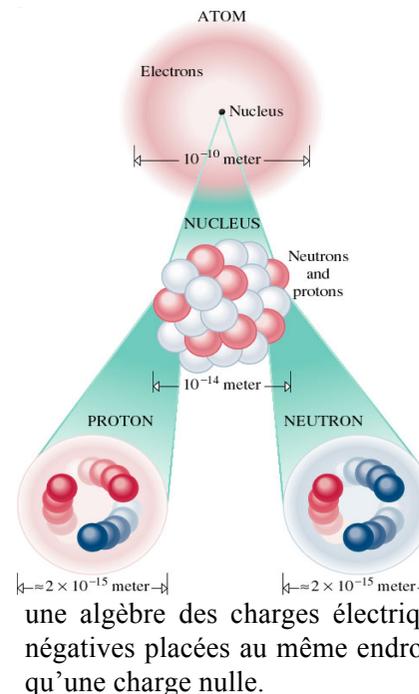
	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2

**QUARKS**

La théorie contemporaine considère que la plupart des particules subatomiques sont constituées de plusieurs variétés d'entités plus fondamentales appelées **quarks** (p.183 et 184 F&T). Il en existe 6 sortes (up, down, charm, strange, top et bottom).

Ceux-ci sont réputés avoir des charges de  $\pm e/3$  et  $\pm 2e/3$ .

Si un objet contient la même quantité de charge positive et négative, ces 2 distributions de charge attirent ou repoussent une charge externe avec 2 forces opposées ; l'objet n'exerce donc aucune force sur une charge externe. Il se comporte comme s'il n'avait aucune charge : on dit qu'il est **électriquement neutre**. Cette

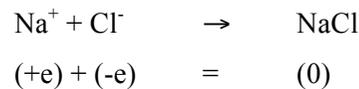


propriété nous permet de concevoir une algèbre des charges électriques : 10 charges positives + 10 charges négatives placées au même endroit s'ajoutent et produisent le même effet qu'une charge nulle.

## Conservation de la charge électrique

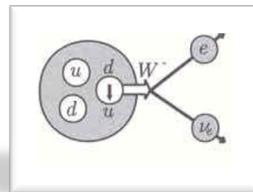
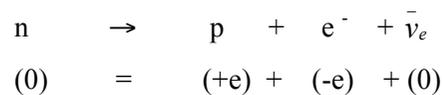
La charge totale (somme algébrique des charges positives et négatives) dans un système isolé reste constante. Ainsi, nous pourrions dire que la charge totale de l'Univers est constante. Cette charge totale de l'Univers est peut-être nulle, pour des raisons de symétrie, mais personne ne peut l'affirmer avec certitude. C'est le doute cartésien ! Retenons cette découverte importante : de même que l'énergie, la charge n'est ni créée ni détruite, elle est transmise d'un corps à l'autre.

Prenons l'exemple d'une réaction chimique :



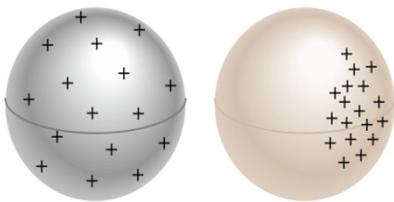
L'atome de sodium Na a perdu un électron pour devenir un ion positif  $\text{Na}^+$ , alors que l'atome de chlore Cl a gagné un électron pour devenir un ion négatif  $\text{Cl}^-$ . Durant la réaction, les ions se combinent pour former la molécule neutre de chlorure de sodium NaCl.

Considérons à présent l'exemple d'une [désintégration radioactive  \$\beta^-\$](#)  (p.185-p.186 F&T) :



Dans ce cas, un neutron de charge nulle subit une [désintégration spontanée](#) pour donner un proton, [un électron](#) et une particule neutre appelée antineutrino. La somme des charges des produits de la [désintégration](#) est égale à la charge du neutron, c'est-à-dire à zéro.

## Isolants et conducteurs



La plupart des substances peuvent être classées en 2 groupes. Celles, comme les métaux ou les solutions ioniques, qui laissent les charges circuler librement sont appelés [conducteurs](#). Celles qui ne laissent pas circuler les

charges, comme le bois, le caoutchouc, le coton, la soie ou le verre, sont des [isolants](#). Ils font intervenir des atomes comme le carbone, l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote qui possèdent un environnement électronique beaucoup plus stable. Les électrons restent fortement liés aux atomes. Un troisième groupe de matériaux, que l'on appelle semi-conducteurs, comprend le silicium, le germanium et le carbone. Lorsqu'ils sont très purs, **les semi-conducteurs** se comportent comme des isolants ; mais en leur ajoutant certaines impuretés (atomes de phosphore, de gallium, de bore, d'arsenic), on arrive à modifier leur pouvoir conducteur. Citons le silicium et le germanium qui sont couramment utilisés dans les circuits électroniques.

Dans un corps non-conducteur, les charges ont une mobilité très limitée. Lorsqu'un **isolant** (plastique, verre, cheveux, cuir,...) reçoit une charge, il retient cette charge et la confine dans la zone où elle a été déposée.

Par contre, un **conducteur** (argent, cuivre, fer, aluminium, or, ...) permet à la charge déposée en un point sur ce corps ou à l'intérieur de se déplacer librement et de se répartir très rapidement sur l'ensemble du conducteur ( $10^{-12}$  s pour le cuivre) car comme les charges de même signe se repoussent, la charge se distribue en totalité sur la surface de l'objet.

Précisons le fait que lorsqu'une sphère conductrice portant une charge de  $-15e$  entre en contact avec une sphère conductrice de taille identique portant une charge de  $+5e$ , la charge totale se divise également entre les 2 sphères : après la séparation, chaque sphère porte une charge de  $-5e$  distribuée sur sa surface.

Comme autre exemple, citons le corps humain qui est un bon conducteur en raison des ions qui se trouvent dans le sang et dans les autres liquides du corps (Ex : expérience de Van de Graaff).

A l'échelle atomique, on peut expliquer la différence entre conducteurs et isolants en observant ce que deviennent les électrons de valence les plus éloignés du noyau, c'est-à-dire les moins liés. Dans un isolant comme le chlorure de sodium (NaCl), l'électron de valence de l'atome de sodium (Na) est pris par l'atome de chlore (Cl). Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  forment des liaisons « ioniques » dans lesquelles tous les électrons sont liés à des sites atomiques donnés. Par contre, dans un conducteur métallique, un électron par atome environ est libre de se déplacer dans l'ensemble du matériau. Un métal est essentiellement constitué d'ions positifs immobiles, disposés en

général selon un arrangement à trois dimensions appelé **réseau**, et entourés d'une foule d'**électrons libres**. La conduction électrique du métal est liée au mouvement des électrons libres, qui se comportent un peu comme les particules d'un gaz dans un récipient fermé (gaz de « fermions »). Dans une solution électrolytique où les molécules sont dissociées en ions de charges opposées, ou dans un gaz ionisé, toutes les charges, positives et négatives, sont en mouvement. Précisons que dans une atmosphère sèche, les ions sont en nombre suffisant pour décharger un objet en quelques minutes (Ex : expérience de Van de Graaff).

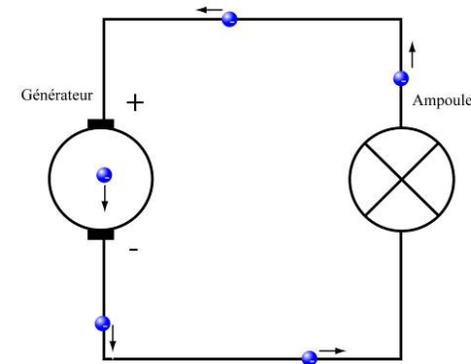
D'autre part, la charge effective qu'un conducteur porte se répartit toujours sur sa surface extérieure. Les charges ont tendance à se concentrer aux endroits pointus d'un conducteur (ex : extrémité d'un paratonnerre). C'est **l'effet de pointe**.

Pour terminer ce paragraphe, parlons de la Terre.

Globalement, notre planète est électriquement neutre. Toutefois, des phénomènes atmosphériques complexes sont responsables d'une séparation des charges entre la surface et la haute atmosphère. La surface de la Terre possède un excès d'électrons correspondant à une charge d'environ  $-500'000$  C compensée par un déficit d'électrons de  $+500'000$  C dans la haute atmosphère. La charge de  $-500'000$  C répartie sur la surface de la Terre correspond à une densité de charge d'environ  $-1$  nC par  $m^2$ . Chaque seconde, sur l'ensemble de la surface de notre planète, une charge de  $-1500$  C s'élève vers la haute atmosphère. A ce rythme, la surface devrait se décharger en 5 minutes ; toutefois, la foudre la recharge constamment. Un éclair dure quelques dixièmes de milliseconde et transporte environ  $-10$  C. Sur l'ensemble de la surface terrestre, il se produit environ 10 millions d'éclairs par jour, ce qui correspond à environ 150 éclairs par seconde. L'électrodynamique est l'étude des charges en mouvement.

Dans certains corps, les charges ont la possibilité de se promener facilement : on parle de corps **conducteurs**. Parmi les conducteurs, citons les métaux et les solutions électrolytiques (que l'on trouve par exemple dans des piles ou des batteries).

Dans le circuit ci-dessous, si un champ électrique  $E$  est établi grâce à la tension électrique  $U$  d'un générateur (différence entre le « + » et le « - »), les électrons « libres » ou « de valence » des conducteurs formant le circuit (les électrons de la dernière couche atomique faiblement liés aux noyaux atomiques) vont pouvoir se déplacer en direction de la borne positive en



raison de la force électrique (« + » et « - » s'attirent).

Par exemple, considérons le cuivre, un des métaux conducteurs les plus utilisés. Le cuivre 63 comporte 29 protons et 34 neutrons. Un atome neutre de cuivre 63 possède 29 électrons. Les 28 premiers électrons remplissent les trois premières couches électroniques contenant respectivement 2, 8 et 18 électrons), et il reste un seul électron sur la dernière couche. Par conséquent le cuivre possède un électron « libre » par atome qui peut se déplacer.

Ce déplacement de charges caractérise le courant électrique  $I$ .

## Le courant électrique

*Définition :*

Le **courant électrique**  $I$  exprimé en Ampères, est la quantité de charge, exprimée en Coulomb, qui passe par un point d'un circuit pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ .

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \text{ [C/s]} = \text{[A]}$$

**Remarques :**

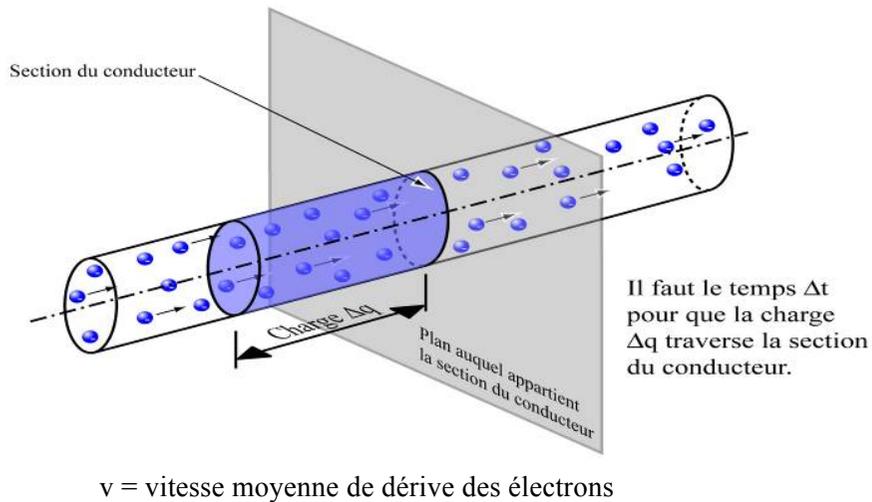
1.- Dans un circuit fermé, le courant circule du potentiel le plus élevé exprimé en volts (par exemple la borne positive d'un générateur ou d'une pile) vers le potentiel le moins élevé (par exemple, la borne négative). Ainsi, le sens conventionnel du courant  $I$  va du + au - dans le circuit (sens horaire donc opposé au mouvement antihoraire des électrons représentés par les sphères bleues sur le schéma ci-dessus).

La différence de potentiel représente la **tension  $U$  exprimée en volts** générée par la pile. *Ex* : pile AA de 1,5 V.

2.- Le courant dans un conducteur de section  $S$  est donné par l'expression suivante :

$$I = qnvS \text{ [A]}$$

où  $n$  = nombre d'électrons par unité de volume  
 $q$  = charge d'un électron



Développement :

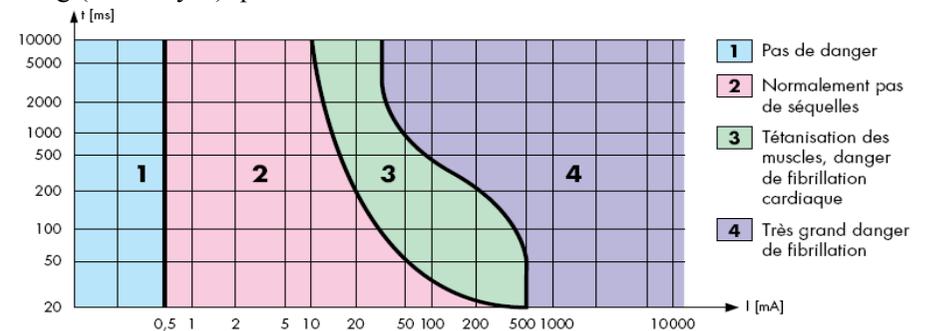
**Le courant électrique et l'être humain**

L'effet du courant électrique sur l'être humain dépend de l'intensité du courant, du chemin parcouru et de la durée d'électrocution.

L'influence de la durée d'électrocution est illustrée par le graphique: L'intensité du courant traversant le corps humain dépend en outre d'autres facteurs tels que : qualité des vêtements, conductibilité du sol, mise à terre éventuelle, intérieur ou extérieur du corps.

Ainsi, si la tension appliquée, notée  $U$ , est de 230 Volts (V), l'intensité du courant sera d'environ **50 milliampères (mA)** et la résistance  $R$  de 4600 ohms ( $\Omega$ ) selon la loi d'ohm  $U = R I$  (c.f § suivant). Cette valeur peut avoir des conséquences mortelles, si la durée d'électrocution dépasse une période cardiaque (env. 0,8 s.). En cas d'humidité élevée, la résistance globale peut chuter à 1000  $\Omega$ , ce qui conduit, pour la même tension appliquée, à une intensité de courant d'env. 230 mA. Cette intensité de courant est significativement mortelle. Un courant de 100 mA qui circule à travers la cage thoracique pendant 1s a une chance sur deux de cause la fibrillation. Les dangers sont les suivants :

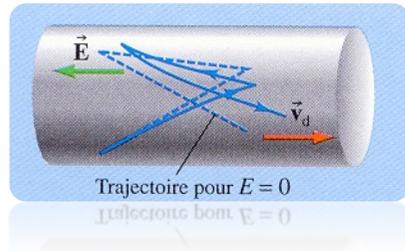
- Le courant électrique produit de la chaleur et peut brûler des parties du corps.
- Le courant électrique agit sur les muscles et peut paralyser (on dit aussi « tétaniser ») le cœur (arrêt cardiaque) ou la cage thoracique (arrêt respiratoire) ou les deux.
- Le courant électrique peut provoquer des réactions chimiques dans le sang (électrolyse) qui détruisent les substances vitales.



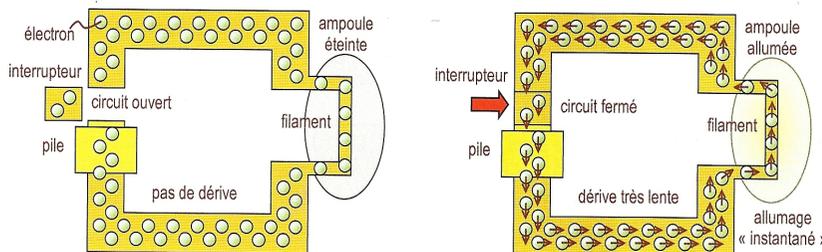
Un défibrillateur produit un courant très intense (environ 10 A) et très bref (environ 5 ms), ce qui arrête momentanément le cœur et lui permet, dans certains cas, de se remettre à battre de manière normale.

## La vitesse de dérive

En connectant un fil conducteur à une source de tension, les électrons « libres » du fil vont se déplacer. On forme alors un courant électrique à l'intérieur du fil. Il nous faut alors considérer différentes vitesses caractérisant les électrons libres :



- 1) La vitesse instantanée due à l'agitation thermique (température). Elle est très élevée, de l'ordre de quelques milliers de km/s (1600 km/s pour le cuivre).
- 2) Dans le cas d'un courant électrique (suite au champ électrique  $E$  établi par le générateur), superposé aux mouvements d'agitation thermique des électrons libres, un mouvement d'ensemble des électrons libres a lieu. Ce glissement des électrons de conduction caractérise la *vitesse de dérive*  $\vec{v}_d$  de l'ordre de quelque mm/minute (de l'ordre de la vitesse d'un escargot!)
- 3) Le fait de brancher une pile dans un circuit entraîne une modification du champ électrique qui se propage à partir de la pile à la vitesse de la lumière (300'000 km/s). Peu importe où les électrons se trouvent à



l'intérieur du fil, ils amorcent leur dérive quasi instantanément (tout comme ceux qui sont présents dans une ampoule).

De même, lorsqu'on ouvre un robinet d'un tuyau d'arrosage et que ce dernier est plein d'eau, une onde de pression parcourt le tuyau à la vitesse du son. Toutefois, la vitesse à laquelle l'eau circule dans le tuyau, est beaucoup plus lente. On peut également faire une analogie avec le mouvement des molécules d'air, lorsqu'il y a du vent. Tout comme les électrons libres dans un fil, les molécules d'air ont une grande vitesse thermique (de l'ordre de 400 m/s) ; toutefois, ce mouvement aléatoire ne produit pas de vent. Le vent est le résultat d'une vitesse de dérive des molécules relativement faible, de l'ordre de quelques mètres par seconde. Même lors d'un ouragan, la vitesse de dérive des molécules d'air (la vitesse du vent) dépasse rarement 10% de la vitesse thermique des molécules.

## La loi d'ohm

Lorsque la tension  $U$  (différence de potentiel) entre les bornes d'un dispositif électrique est directement proportionnelle au courant  $I$  qui le traverse, le coefficient de proportionnalité est appelé la résistance  $R$ , exprimée en ohm  $[\Omega]$ .

$$U = R I$$

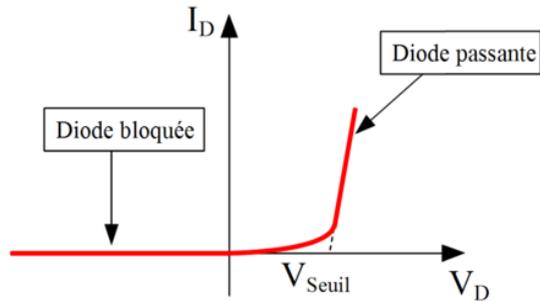
Loi d'ohm (1826)

Plus la résistance d'un conducteur est grande, plus le courant sera petit pour une même tension appliquée. La résistance d'un conducteur est donc une mesure de l'opposition qu'offre le conducteur au passage du courant.

La loi d'ohm affirme que le courant circulant à l'intérieur d'un dispositif est toujours directement proportionnel à la différence de potentiel (tension) appliquée à ce même dispositif. Ainsi, un dispositif conducteur obéit à la loi d'ohm lorsque la résistance du dispositif est indépendante de la grandeur et de la polarité relatives à la différence de potentiel appliquée.

La microélectronique, et par conséquent, une partie importante de la technologie actuelle dépend presque exclusivement de dispositifs qui n'obéissent pas à loi d'ohm. Votre calculatrice en contient par exemple un grand nombre.

A titre d'exemple, une diode utilisée durant les laboratoires. Nous pouvons remarquer que la courbe entre le courant  $I_D$  passant dans la diode et la tension  $V_D$  aux bornes de la diode n'est pas exactement une droite affine.



En fait, la résistance d'un conducteur dépend de la résistivité du matériau, de sa longueur et de sa section.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

où

$\rho$  = résistivité [ $\Omega\text{m}$ ] (l'inverse de la résistivité étant la conductivité  $\sigma$ ) (p.163 F&T)  
 $l$  = longueur du conducteur [m]  
 $S$  = section du conducteur [ $\text{m}^2$ ]

La résistivité  $\rho$  dépend du conducteur : la résistivité est une propriété relative à un matériau (alors que la résistance est une propriété relative à un objet). Elle est très faible pour l'argent ( $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8}$  [ $\Omega\text{m}$ ]) et pour le cuivre ( $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  [ $\Omega\text{m}$ ]). Il serait avantageux donc d'utiliser des fils d'argent pour le transport électrique ! (Il faut tout de même tenir compte de l'argument économique).

Un matériau conducteur obéit à la loi d'ohm lorsque sa résistivité est indépendante de la grandeur et de la direction du champ électrique appliqué. Tous les matériaux homogènes, qu'il s'agisse de conducteurs (par exemple le cuivre) ou de semi-conducteurs (par exemple le silicium

pur ou le silicium contenant des impuretés quelconques), obéissent à la loi d'ohm à l'intérieur d'une échelle de valeurs du champ électrique. Par contre, si le champ est trop fort (d'où une augmentation de la température), ils ne respectent pas toujours la loi d'ohm.

*Développement :*

Notons que la résistivité d'un matériau dépend de sa température. La résistivité  $\rho$  d'un métal à la température  $T$  s'exprime en fonction de la résistivité  $\rho_0$  à une température  $T_0$  :

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

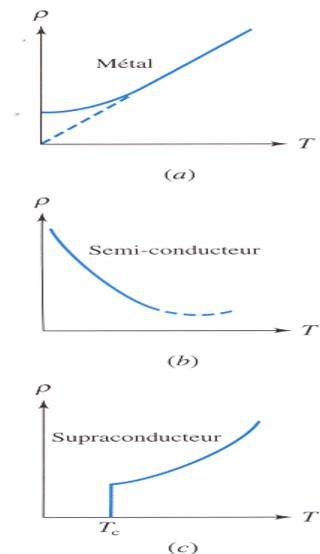
où

$\alpha$  = coefficient thermique de résistivité [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ]

*n.b :* le carbone a une résistivité pratiquement constante sur une grande plage de température. C'est pourquoi on l'utilise dans la confection de résistance.

*Interprétation microscopique :*

Les électrons entrent en collision avec les ions positifs du réseau cristallin. Ces ions vibrent autour de leurs positions d'équilibre. Au fur et à mesure que la température s'élève, l'amplitude de ses vibrations augmente et gêne de plus en plus l'écoulement des électrons. Les 2 autres facteurs sont les inévitables impuretés et les défauts de structure dans le réseau cristallin.



Les contributions aux collisions des impuretés et des défauts dans le cristal sont essentiellement indépendantes de la température. C'est pourquoi la résistivité des métaux courants n'est pas nulle, même à  $T = 0 \text{ K}$ .

Deux autres types de matériaux méritent d'être mentionnés. La résistivité des **semi-conducteurs** purs, comme le silicium, le germanium, le gallium et le carbone, diminue lorsque la température augmente. Ce phénomène est lié à l'augmentation du nombre d'électrons qui deviennent libres et participent à la conduction. Une caractéristique encore plus intéressante des semi-conducteurs est que l'on peut agir sur leur résistivité en ajoutant certaines impuretés au matériau pur. C'est cette propriété qui est utilisée dans la fabrication des transistors et des circuits intégrés.

Dans certains matériaux, appelés **supraconducteurs**, la résistivité devient nulle en dessous d'une température critique  $T_c$ . Lorsqu'un courant est établi dans un supraconducteur, il persiste indéfiniment à condition que la basse température soit maintenue.

## La puissance électrique

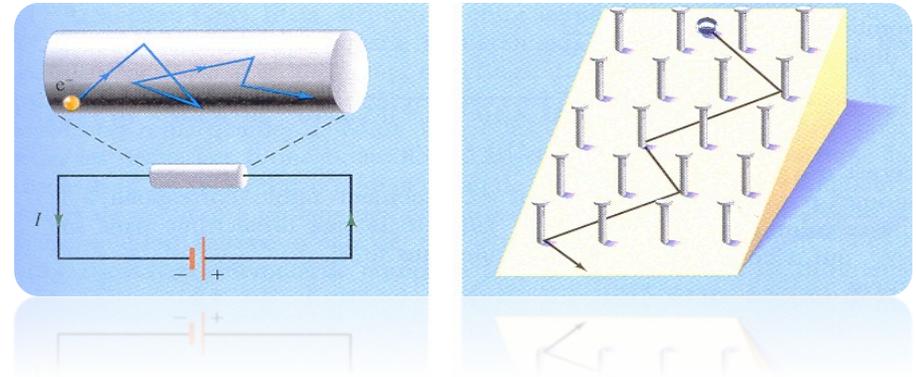
### L'effet Joule

Lorsqu'un courant passe à travers une résistance  $R$ , la puissance électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P = UI = [J/C \cdot C/s] = [J/s] = [W] = R I^2 = \frac{U^2}{R}$$

La course d'un électron qui circule dans une résistance à une vitesse de dérive constante est semblable à la trajectoire d'une pierre qui chute dans l'eau à une vitesse constante. L'énergie cinétique moyenne de l'électron demeure constante, et l'énergie potentielle électrique qu'il a perdue se retrouve sous forme d'énergie thermique à l'intérieur et autour de la résistance. A l'échelle microscopique, ce transfert d'énergie est attribuable aux collisions entre l'électron et les molécules de la résistance, ce qui entraîne une hausse de température de la résistance. L'énergie mécanique ainsi transférée en énergie thermique est *dissipée* (perdue) parce qu'on ne peut inverser le processus (2<sup>ème</sup> principe de thermodynamique).

Notons toutefois que la formule  $P = UI$  est valable pour tous les types de transfert d'énergie et, que d'autre part,  $P = R I^2 = \frac{U^2}{R}$  n'est valable que pour le transfert de l'énergie potentielle électrique qui se transforme en énergie thermique à l'intérieur d'un dispositif possédant une résistance.



Les applications de l'effet Joule sont notamment :

- 1.- Les corps de chauffe électriques
- 2.- Le fusible
- 3.- Les lampes à incandescence (filament chauffé)
- 4.- Les pertes d'énergie dans tous les conducteurs et comme conséquence pratique, l'utilisation de la haute tension pour le transport de l'énergie électrique.

*Remarque :*

La puissance s'exprime en J/s ou en W. L'unité d'énergie est le joule qui est une trop petite quantité. Généralement, l'unité employée par les producteurs d'électricité est le kWh.

*Définition :*

Le kilowattheure correspond à l'énergie utilisée pendant une heure par un appareil consommant 1000 J/s, ce qui équivaut à  $3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ .

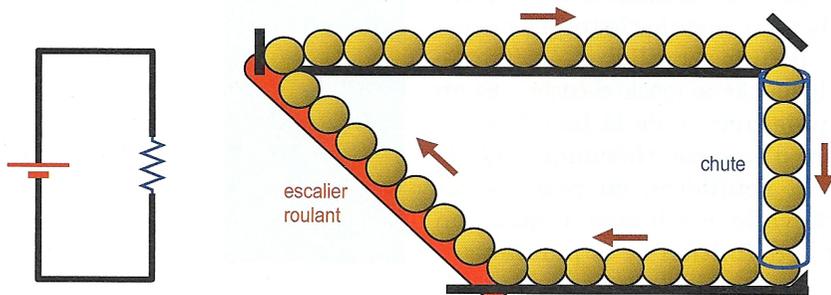
## Etablissement d'un courant dans un fil métallique

Le générateur ou la pile ne crée pas les charges qui sont déjà présentes dans le métal. Il provoque la **circulation** des électrons libres. Il se comporte comme une « pompe » qui aspire les électrons par sa borne positive et les refoule par sa borne négative. L'ajout d'un générateur dans le circuit impose une différence de potentiel électrique (c'est-à-dire une **tension électrique notée  $U$** ) entre les extrémités de la boucle qui sont reliées aux bornes du générateur (ou de la pile). Celle-ci engendre ainsi un champ électrique  $E$  à l'intérieur de la boucle, d'une borne à l'autre. Ce champ provoque le mouvement des électrons à l'intérieur de la boucle de la borne négative vers la borne positive. Pour entretenir cette circulation, le générateur (la pile) utilise de l'énergie. A l'intérieur du générateur, le sens des électrons va de la borne positive en direction de la borne négative et déjà là, nous nous rendons bien compte que cela n'ira pas tout seul, en raison des forces électriques exercées (– et – se repoussent !).

## L'analogie mécanico-gravitationnelle d'un circuit

Un « courant de billes » circule le long d'un parcours fermé composé :

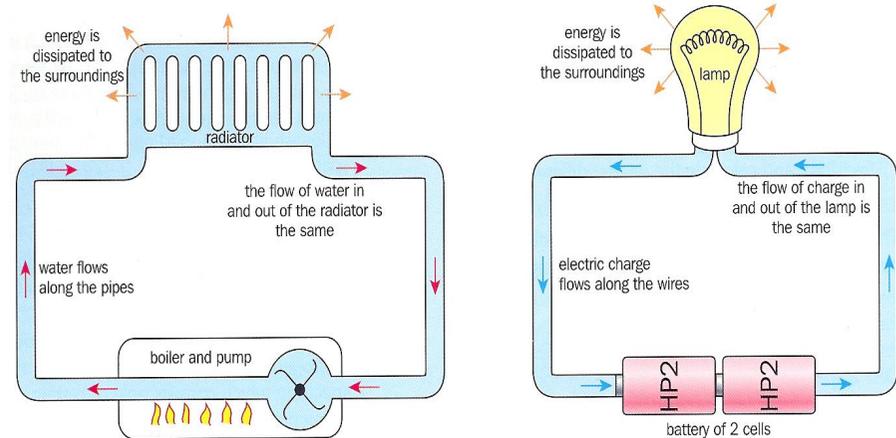
- d'un escalier roulant qui représente la pile
- de deux paliers horizontaux qui représentent les files de connexion sans résistance
- d'une chute (cylindre) qui représente la résistance et qui permet au billes de revenir à leur hauteur d'origine.



Lorsque les électrons circulent dans le circuit, ils ne s'accumulent jamais en quantité importante à un endroit du circuit : on peut considérer que chaque portion du circuit demeure électriquement neutre. Dans le modèle mécanique, les billes sont incompressibles et sont toujours collées les unes contre les autres : ainsi, il n'y a jamais d'accumulation de billes dans un secteur particulier du parcours.

La pile donne de l'énergie potentielle électrique aux électrons qu'elle pompe ; de même, l'escalier roulant donne de l'énergie potentielle gravitationnelle aux billes. Les électrons redonnent cette énergie lors de leur passage dans la résistance, qui s'échauffe et produit de l'énergie thermique. De même, les billes redonnent leur énergie en tombant dans la chute : comme leur énergie cinétique demeure toujours constante, l'énergie potentielle gravitationnelle se transforme en énergie thermique dans la chute, en raison des collisions entre les billes et les parois de la chute.

Une autre analogie peut être établie en considérant le système de chauffage :



## La force électromotrice

L'efficacité d'une pile est spécifiée par un voltage. Par exemple, les piles AA sont des piles de 1,5 V. Le volt correspond à une énergie divisée par une charge :

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule} / 1 \text{ coulomb}$$

L'énergie en question est de l'énergie potentielle électrique : il s'agit de l'énergie que possède un système de particules chargées en interaction. En raison des forces électriques qu'elles exercent l'une sur l'autre, des particules chargées en interaction peuvent gagner ou perdre de l'énergie cinétique. Ce gain ou cette perte se fait au détriment de l'énergie potentielle électrique que possède le système de particules. Lorsque les électrons traversent l'intérieur d'une pile, les réactions chimiques leur donnent de l'énergie potentielle électrique. On pourrait décrire une pile en spécifiant le gain d'énergie potentielle qu'elle fournit à chaque électron.

Une pile est un exemple de source de **force électromotrice**, notée f.é.m.

### Définition :

la f.é.m d'un dispositif (pile, générateur,...) correspond au travail par unité de charge accompli pour faire circuler celle-ci entre sa borne de faible potentiel (signe -) à sa borne de potentiel élevé (signe +) :

$$\varepsilon = \frac{W_{né}}{q} [\text{V}]$$

Il s'agit donc d'une tension exprimée en volts.

L'indice « né » signifie que le travail est effectué par un agent non électrostatique. C'est en transformant en énergie électrique une énergie d'une autre nature qu'un générateur peut faire circuler un courant dans un circuit.

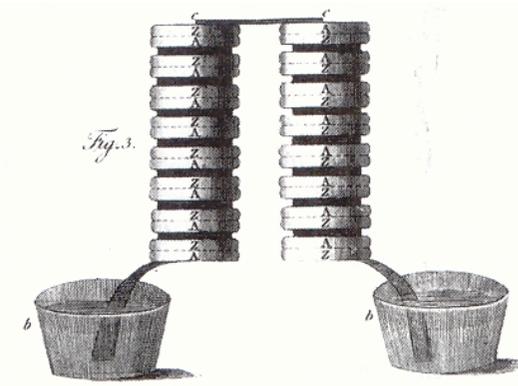
Cette source d'énergie peut être de nature :

- chimique s'il s'agit d'une pile ou d'une batterie d'accumulateurs
- mécanique dans le cas de la triboélectricité, de la piézo-électricité découvert en 1880 par les frères Curie ; apparition de charges à la surface de certains cristaux isolants très anisotropes lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques ; inversement, quand ces substances sont soumises à un champ électrique, elles sont susceptibles de se déformer. Le meilleur exemple est le quartz piézo-électrique utilisé en horlogerie, ou la dynamo (dans ce dernier cas, on crée un courant alternatif).
- électromagnétique si on a affaire à une cellule photovoltaïque
- thermique quand le générateur est un thermocouple (on a alors conversion d'énergie interne U en énergie électrique).

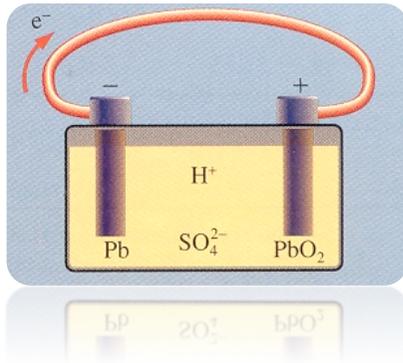
Ex : une batterie de 12 V effectue un travail de 12 J à transporter un 1 C de charge à travers le circuit.

## La production d'un courant par une pile

Volta expliquait le fonctionnement de la **pile voltaïque** par une différence de potentiel créée par le contact de 2 métaux. La solution saline ou acide (appelée électrolyte) servait uniquement de conducteur.

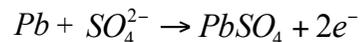


## Fonctionnement d'une pile plomb-acide

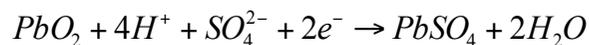


Une électrode de plomb (Pb) et une électrode d'oxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>) sont immergées dans une solution aqueuse d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) qui se dissocie en ions hydrogène positifs (H<sup>+</sup>) et en ions sulfate négatifs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Lorsqu'on relie les bornes par un fil, les réactions suivantes ont lieu.

Sur l'électrode de Pb,



Les 2 électrons libérés dans cette réaction quittent la borne de plomb et pénètrent dans le fil. Sur l'électrode de PbO<sub>2</sub>, 2 autres électrons quittent le fil pour pénétrer dans la borne et la réaction suivante a lieu :



On remarque que, pour chaque électron quittant l'électrode de Pb, un autre arrive sur l'électrode de PbO<sub>2</sub> : le fil lui-même n'acquiert aucune charge nette. Le sulfate de plomb (PbSO<sub>4</sub>) se dépose sur les 2 électrodes et l'acide est consommé. Il y a transfert continu d'électrons de l'électrode de Pb, qui agit comme borne négative, à l'électrode de PbO<sub>2</sub>, qui agit comme borne positive.

*Le résultat :*

Un courant qui circule dans le fil extérieur. Une différence de potentiel constante de 2 V est maintenue entre les électrodes. Une batterie d'automobile contient 6 cellules en série, qui donne une différence de potentiel de 12 V.

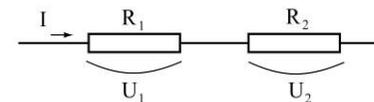
Au fur et à mesure qu'on utilise la batterie, la concentration en acide de la solution diminue, faisant chuter sa densité.

On procède à la recharge en reliant la batterie à une f.é.m plus puissante. A chacune des électrodes se produisent alors les réactions chimiques inverses qui éliminent le PbSO<sub>4</sub> et remettent l'acide en solution. Une fois la pile complètement rechargée, il est important de la couper de la f.é.m extérieure. Si on poursuit le processus alors que les électrodes ont retrouvé leur composition d'origine, l'énergie de la f.é.m sert alors à briser les molécules d'eau de la solution en leur constituant (H et O), qui forment un mélange particulièrement explosif (pile é hydrogène).

## Les groupements de résistance

### Les résistances placées en série

Deux ou plusieurs résistances sont dites placées en série lorsqu'elles sont traversées par le même courant I, quelles que soient les variations de ce dernier.



Dans le circuit ci-contre, le courant I est le même tout le long du circuit.

Au cours d'un laps de temps  $\Delta t$ , la charge  $\Delta q$  traversant le générateur et les deux résistances possède la même valeur puisque  $\Delta q = I \cdot \Delta t$ . Il ne s'agit pas des mêmes électrons, mais la charge  $\Delta q$  qu'ils représentent est la même.

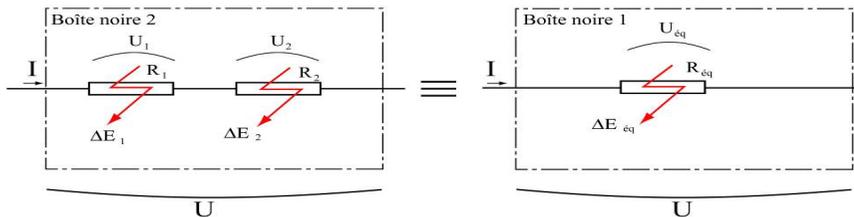
Par conservation de l'énergie, on peut écrire que durant le temps  $\Delta t$ , l'énergie  $\Delta E_G$  injectée par le générateur dans le circuit va se retrouver dissipée entièrement par effet joule dans les résistances, à savoir  $\Delta E_1$  dans la résistance R<sub>1</sub> et  $\Delta E_2$  dans la résistance R<sub>2</sub>.

$$\Delta E_G = \Delta E_1 + \Delta E_2$$

En divisant chaque terme de cette égalité par  $\Delta q$ , on obtient une relation entre les tensions aux bornes des éléments, à savoir :

$$U_G = U_1 + U_2$$

### Résistance équivalente de deux résistances placées en série



La résistance équivalente  $R_{eq}$  (boîte noire 1) doit remplacer les résistances  $R_1$  et  $R_2$  (boîte noire 2) sans changer le fonctionnement du circuit.

Cherchons sa valeur :

Le courant  $I$  traversant les résistances étant le même, divisons la relation liant les tensions par le courant  $I$  :

$$\frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_{eq}}{I} \Rightarrow \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = \frac{U_{eq}}{I} \Rightarrow R_1 + R_2 = R_{eq}$$

Dans un circuit série, la résistance équivalente représente simplement la somme des résistances placées en série.

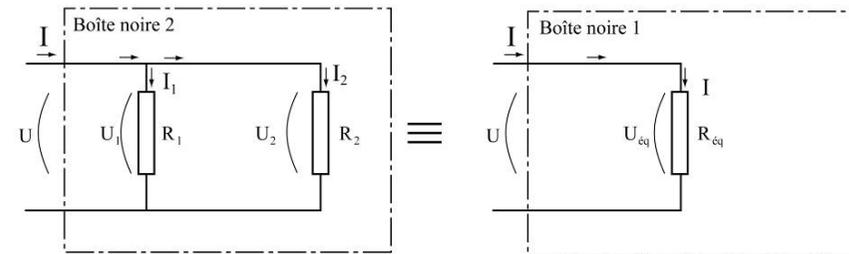
Pour plus de deux résistances, la relation devient :

Résistances en série :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

### Les résistances placées en parallèle

Deux ou plusieurs résistances sont dites placées en parallèle lorsque la tension à leurs bornes est la même, quelles que soient les variations de cette dernière.



Considérons le circuit parallèle ci dessus.

La tension  $U$  est la même aux bornes des divers éléments du circuit. Au cours d'un laps de temps  $\Delta t$ , la charge  $\Delta q_G$  débitée par le générateur se partagera entre les deux résistances  $R_1$  et  $R_2$

$$\Delta q_G = \Delta q_1 + \Delta q_2$$

En divisant chaque terme de cette égalité par  $\Delta t$ , on obtient une relation entre les courants traversant les éléments, à savoir :

$$I_G = I_1 + I_2$$

### Résistance équivalente de deux résistances placées en parallèle

La résistance équivalente  $R_{eq}$  placée dans la boîte noire 1 doit remplacer les deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  placées en parallèle de la boîte noire 2.

Par définition, on a :

$$U_{eq} = U_1 = U_2$$

Or

$$I_{\text{éq}} = I_1 + I_2$$

Donc

$$\frac{I_{\text{éq}}}{U_{\text{éq}}} = \frac{I_1 + I_2}{U_{\text{éq}}} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

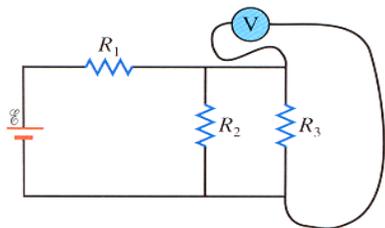
L'inverse de la résistance équivalente est égal à la somme des inverses des résistances.

Pour plus de deux résistances, il est possible de généraliser :

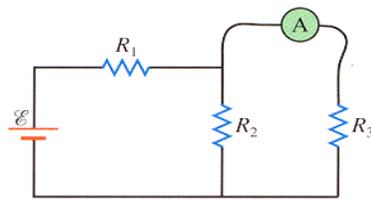
Résistances en parallèle :

$$\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

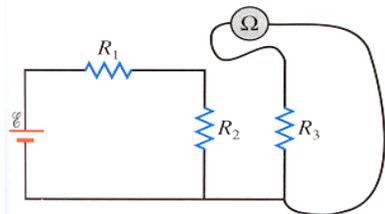
## Les instruments de mesure



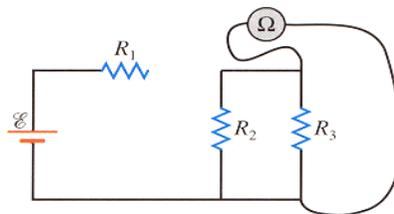
(a)



(b)



(c)



(d)

### Le voltmètre

Il mesure la différence de potentiel entre les 2 points du circuit où on place les sondes (2 électrodes provenant de l'appareil). Il se place toujours **en parallèle** avec la résistance.

Lorsqu'on utilise un appareil de mesure, on ne veut pas que la présence de l'appareil modifie de manière appréciable ce que l'on veut mesurer. Puisque le voltmètre est placé à l'extérieur du circuit, il faut limiter au maximum la fraction du courant qui va être déviée à travers le voltmètre. Ainsi, il faut que **la résistance interne du voltmètre soit très grande**.

### L'ampèremètre

Pour mesurer le courant en un point du circuit, il faut placer l'ampèremètre dans le circuit à l'endroit qui nous intéresse afin que tout le courant que l'on veut mesurer traverse l'ampèremètre. L'ampèremètre se branche donc **en série** dans le circuit. Pour limiter les effets de sa présence sur ce que l'on veut mesurer, il faut que **la résistance interne de l'ampèremètre soit très petite**.

### L'ohmmètre

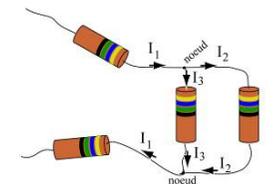
Il possède une pile interne et il envoie du courant dans le circuit qu'il mesure. L'ohmmètre calcule le rapport entre la tension de sa pile interne et le courant qu'il génère, ce qui correspond à la résistance équivalente du circuit. Si on veut mesurer la valeur d'une résistance (ou d'une combinaison de résistances), il faut brancher cette résistance à l'ohmmètre alors qu'elle n'est pas branchée au reste du circuit ; sinon la pile du circuit interférera avec la pile de l'ohmmètre, et les résultats seront faussés.

### Les lois de Kirchhoff

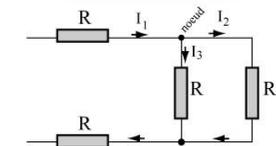
L'analyse des circuits électriques est simplifiée grâce à l'utilisation des 2 lois qui furent énoncées par Kirchhoff : la loi des nœuds et la loi des mailles.

#### Loi des nœuds

La somme algébrique (compte tenu du sens des courants) est nulle au niveau d'un nœud.



$$I_1 = I_2 + I_3$$



$$\sum I = 0$$

**Loi des mailles**

Le long d'une maille, la somme des tensions est nulle.

$$\sum U = 0$$

La 2<sup>ème</sup> loi nous indique qu'en faisant un tour complet, on doit se retrouver au même potentiel. Cette loi découle de la conservation de l'énergie : l'énergie potentielle fournie à une charge par la source de f.é.m (générateur) est perdue dans les résistances.

Pour l'application de ces lois, faisons les remarques suivantes :

a.- Les sens des courants peuvent être attribués de manière **arbitraire** s'ils ne sont pas connus. Les résultats numériques, positifs ou négatifs, vous indiqueront si le sens était juste ou faux.

b.- On donnera un sens de parcours à chaque maille. Lorsqu'on traverse alors une résistance et que le sens de parcours correspond à celui du courant, on rencontre des **potentiels décroissants** et inversement. Quand on traverse une source de tension dans le sens de la borne négative à la borne positive, on rencontre un potentiel croissant et inversement.

c.- On choisira autant d'équations que d'inconnues, chaque équation étant une loi de Kirchhoff sur un nœud (N-1 équations si N nœuds) ou sur une maille. La difficulté réside donc dans un choix d'équations indépendantes l'une de l'autre.

**Courant continu et courant alternatif**

La plupart des lampes de l'époque étaient de basse résistance et devaient être montées en série, fonctionnant avec un courant continu et par conséquent ne pouvaient être éteintes sans couper le circuit et éteindre toutes les autres lampes.

En 1880, Edison invente la lampe à incandescence de haute résistance et fonctionnant avec un faible courant continu.

*L'intérêt :*

ces lampes pouvaient être montées en // car le courant principal pouvait être partagé en plusieurs petits courants, chacun alimentant une seule lampe qui pouvait être allumée et éteinte à volonté.

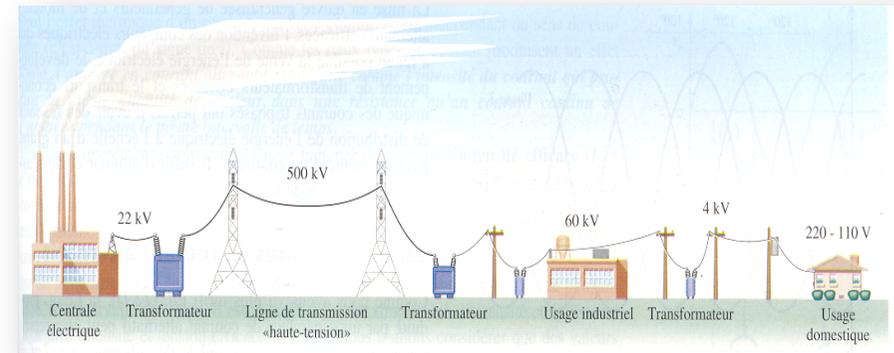
2014-2015

Mentionnons le théorème de maximum de transfert de puissance :

*La puissance transférée à un dispositif est maximum lorsque la résistance R du dispositif est égale à la résistance interne r du générateur.*

On peut par exemple régler la résistance interne d'un amplificateur stéréo pour que sa résistance interne soit égale à celle des haut-parleurs.

Lors des constructions des premières centrales électriques se posa le problème de l'effet Joule : comment diminuer les pertes par effet Joule dans les câbles qui transportent l'électricité ?



*Prenons un exemple :*

Une ville moyenne a besoin d'une puissance d'environ 10 MW. Sachant que la tension demandée est d'environ 100 V, le courant serait alors de  $10^5$  A. Or, l'effet Joule dans un conducteur,  $P = RI^2$ , varie en  $I^2$ .

*La solution :*

Il faut augmenter la tension de transport et surtout baisser le courant passant dans les câbles. Comme le transformateur existait déjà pour abaisser la tension alternative, sans aucun dispositif comparable pour la tension continue, le choix était fait. Le courant alternatif fut développé dans ses premières heures par Tesla.

Notons que la fréquence utilisée est de 50 Hz en Europe.

Les électrons se déplacent pendant 1/100s dans un sens, puis pendant 1/100s dans l'autre sens. Par conséquent, la vitesse de dérive résultante est

P.G

nulle. Les électrons mis en mouvement dans la centrale électrique ne se rendront donc jamais jusqu'à votre résidence : l'oscillation des électrons à la centrale induit des oscillations partout dans le réseau électrique, ce qui fait osciller les électrons dans les fils de votre résidence. La compagnie d'électricité ne vous vend pas des électrons : elle ne fait que mettre en mouvement les électrons qui se trouvent déjà dans vos fils.

Le transport de ce courant s'effectue en utilisant 3 tensions transportées sur 3 câbles avec des tensions sinusoïdales (alternatives) déphasées de  $2\pi/3$ . Cette configuration permet l'apport d'une puissance élevée.

## Série d'exercices

1.- Calcule la charge que l'on ferait apparaître sur une boule de fer de 200 g, si on enlevait 1 électron par atome

2.- Un éclair, qui dure 10  $\mu$ s, fait circuler une charge de 5 C. Que vaut le courant électrique associé à l'éclair ?

3.- Une pile génère un courant de 2 A pendant 3 h 00.

a) Quelle charge électrique sort de la batterie pendant cette durée ?

b) La capacité des piles est indiquée en ampères-heures (Ah). Par exemple, la pile ci-dessus peut produire 6 Ah.

Quelle est l'énergie totale, en kilowattheures, qui est stockée dans une pile de 9V ayant une capacité de 1 Ah ?

c) A 15 centimes le kWh, quelle est la valeur de l'électricité produite par cette pile ?

4.- Détermine la résistance d'un fil de cuivre d'un km de long et dont la section est de 1 mm<sup>2</sup>.

5.- Un fil de 100 m de longueur et de 1 mm de rayon est constitué d'un métal inconnu. Lorsqu'on applique une tension de 8 V à ses extrémités, un courant de 9,3 A circule dans le fil. De quel matériau s'agit-il ?

6.- La tension aux bornes d'un câble électrique vaut 24 V. Quelle charge doit circuler dans ce conducteur pour que 1000 J d'énergie électrique soient transformés en chaleur par effet Joule ?

7.- Une pile de 4,5 V a un rendement de 90%. Combien d'énergie chimique est consommée par la pile pendant qu'elle fait circuler une charge de 5 C dans un circuit ?

8.- On a mis au point une ampoule fluo-compacte écoénergétique de 11 W qui produit le même éclairage qu'une ampoule incandescente traditionnelle de 40 W. Si on suppose que la société productrice d'électricité facture l'énergie fournie à un tarif de 15 centimes / kWh, quelle somme l'utilisateur de cette ampoule écoénergétique épargne-t-il après 100 h d'utilisation ?



9.- La différence de potentiel (tension) entre les extrémités d'un neurone au repos dans le corps humain est d'environ 75 mV, et le neurone porte un courant d'environ 0,2 mA. Quelle est la puissance produite par le neurone ?

10.- L'élément chauffant d'un grille-pain est un ruban de nichrome de section rectangulaire de 0,08 mm par 1 mm. Sa résistance vaut 46  $\Omega$  à 20°C.

a) Quelle est sa longueur ?

b) Que peut-on dire de sa résistance lorsque le grille-pain, est en fonction depuis plusieurs secondes ?

11.- On suppose qu'un lecteur de DVD portatif porte un courant de 350 mA à 6 V. Quelle est la puissance requise pour le fonctionnement du lecteur ?

12.- Une bouilloire de 2 kW et de 230 V consomme pour 11 francs d'énergie électrique. Combien de temps a-t-il fonctionné si le prix du kWh est de 15 centimes ?

13.- Un radiateur électrique porte l'indication suivante « 1500 W, 230 V ».

- Combien de courant le traverse lorsqu'il fonctionne normalement ?
- Que vaut la résistance de son corps de chauffe ?
- Combien coûte une utilisation de 8 h par jour durant l'hiver ?

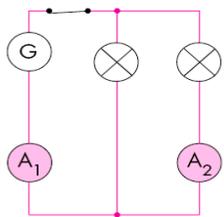
14.- Un petit ventilateur de voyage a une puissance de 15 W lorsqu'il est alimenté par une pile de 12 V dont la f.é.m est de 12 V. On désire déterminer la puissance si la pile ne fournit plus que 10 V.

15.- Nous avons à disposition 2 petites lampes électriques sur lesquelles il est écrit 8 Volts, 1 Watt. Nous branchons ces lampes en série avec une autre résistance R à une source de tension de 20 V.

- Calcule la résistance R de sorte que les lampes fonctionnent normalement.
- Calcule le rendement du système (Puissance utile / Puissance fournie)

16.- Pour faire démarrer une voiture moderne, la batterie de 12 V doit fournir un courant de 300 A au démarreur.

- Quelle est la puissance fournie par la batterie ?
- Pour faire démarrer les premières automobiles, il fallait alimenter le démarreur à l'aide d'une manivelle. Sachant qu'un adulte peut générer environ 600 W de cette façon, déterminez combien il faudrait d'adultes



pour faire démarrer une voiture moderne.

17.- Examine la figure. Combien y a-t-il de noeuds dans le circuit ?

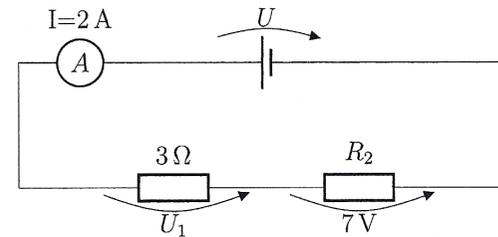
Quel est l'ampèremètre qui indique la plus grande intensité ?

18.- Un lustre possède cinq ampoules traversées chacune par une intensité de 0,27 A. Faire le schéma du montage et placer un ampèremètre pour mesurer l'intensité qui passe dans les fils d'alimentation.

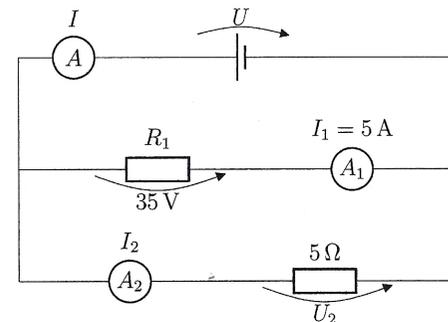
Qu'indique cet ampèremètre ?

19.- Une pile alcaline du type LR6, AA, 1,5 V, coûte environ 0,8 franc et peut fournir une énergie électrique de 11'200 J. Dans ces conditions, à quel prix revient le kWh ?

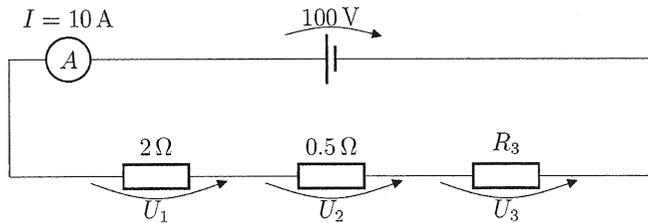
20.- Déterminer les tensions  $U_1$  et  $U$ , ainsi que la résistance  $R_2$  dans le circuit suivant :



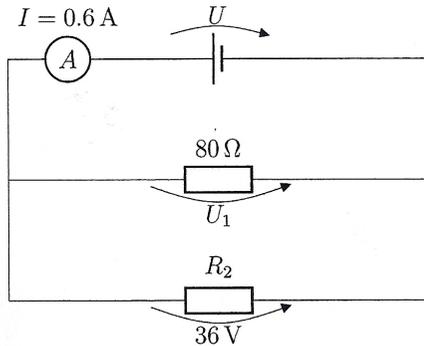
21.- Déterminer les tensions  $U$  et  $U_2$ , les courants  $I$  et  $I_2$ , ainsi que la résistance  $R_1$  dans le circuit.



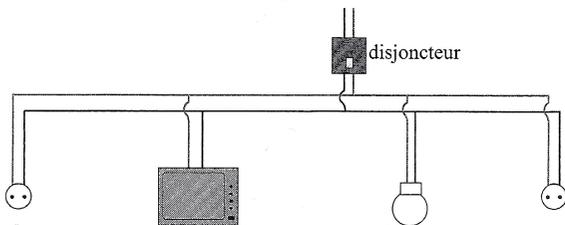
22.- Déterminer les tensions  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , ainsi que la résistance  $R_3$  dans le circuit suivant :



23.- Déterminer l'intensité du courant qui traverse la résistance  $R_2$  ainsi que la valeur de la résistance  $R_2$  dans le circuit suivant.



24.- Un disjoncteur de 13 A protège le circuit électrique d'une chambre. Ce circuit alimente deux prises, une télévision de 200 W et une lampe de 40 W. On branche un chauffe-eau de 1200 W et un radiateur de 800 W dans les prises. Que fait le disjoncteur lorsqu'on allume ces quatre appareils en même temps ? La tension du réseau est de 230 V.

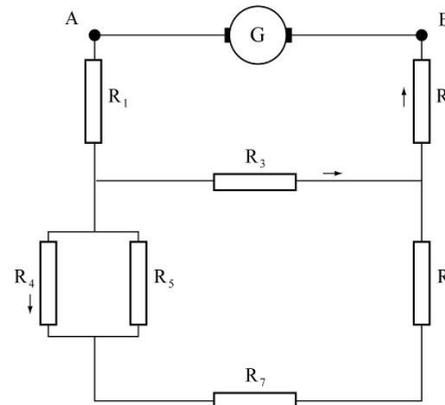


25.- Une télévision consomme une puissance  $P = 160$  W sous une tension  $U = 230$  V.

- Quel est le courant  $I$  utilisé par ce poste TV ?
- En une journée (24 h), quelle est l'énergie, en kWh et J, consommée par ce poste TV ?
- Si à un moment donné, 60'000 ménages genevois regardent la télévision, quelle sera la puissance totale nécessaire ?
- Quel courant devrait transporter une ligne haute tension de 220'000 V pour satisfaire cette seule demande ?

26.- Complète le schéma électrique ci-dessous en indiquant très clairement :

- Le sens du courant là où il n'est pas indiqué.
- La polarité entre les points A et B.
- La valeur des intensités manquantes, en sachant que :  $I_2 = 6$  A ;  $I_3 = 2$  A ;  $I_4 = 1,5$  A.
- La position d'un ampèremètre mesurant  $I_5$ .
- La position d'un voltmètre mesurant la tension aux bornes de  $R_6$ .



27.- Une bouilloire dont l'élément chauffant possède une résistance de  $15 \Omega$  est branchée par 2 fils ayant chacun une résistance de  $0,2 \Omega$  à une source de tension de  $120 \text{ V}$  dont la résistance est négligeable. S'il y a un court-circuit dans la bouilloire qui permet au courant de revenir à la source sans passer par l'élément chauffant, détermine :

- a) le courant (en considérant que les fils sont les seuls à contribuer à la résistance du circuit).
- b) la puissance dissipée par effet Joule (Si cela se produit réellement dans une maison, le disjoncteur dans le panneau de distribution coupe le contact et évite la catastrophe).

28.- Pour protéger une machine à laver de puissance  $2,5 \text{ kW}$  branchée au secteur de tension  $230 \text{ V}$ , un électricien a le choix entre des fusibles de  $10 \text{ A}$ , de  $13 \text{ A}$ , de  $16 \text{ A}$ , et de  $20 \text{ A}$ . Quel type de fusible installera-t-il ?

29.- Un fer à repasser  $1,9 \text{ kW}$ , un radiateur de  $2,4 \text{ kW}$  et une cafetière de  $900 \text{ W}$  sont branchées sur une multiprise portant les indications «  $P_{\max} = 3500 \text{ W} / 230 \text{ V}$  ». La tension du secteur est de  $230 \text{ V}$ .

- a) Les appareils sont-ils branchés en série ou en parallèle sur la multiprise ?
- b) Calculer le courant qui traverse le fer à repasser lorsque celui-ci fonctionne.
- c) Calculer le courant total qui traverse la multiprise lorsque le fer à repasser, le radiateur et la cafetière fonctionnent simultanément.
- d) Selon les indications notées sur la multiprise, quelle valeur le courant total traversant la multiprise ne devrait-il pas dépasser ?
- e) Quel danger court-on à laisser les trois appareils fonctionner simultanément sur la multiprise ?